

U10350 Interferómetro de precisión
U10351 Equipo complementario

Instrucciones de uso

11/04 MH



Índice

1. Volumen de suministro, denominación de los componentes

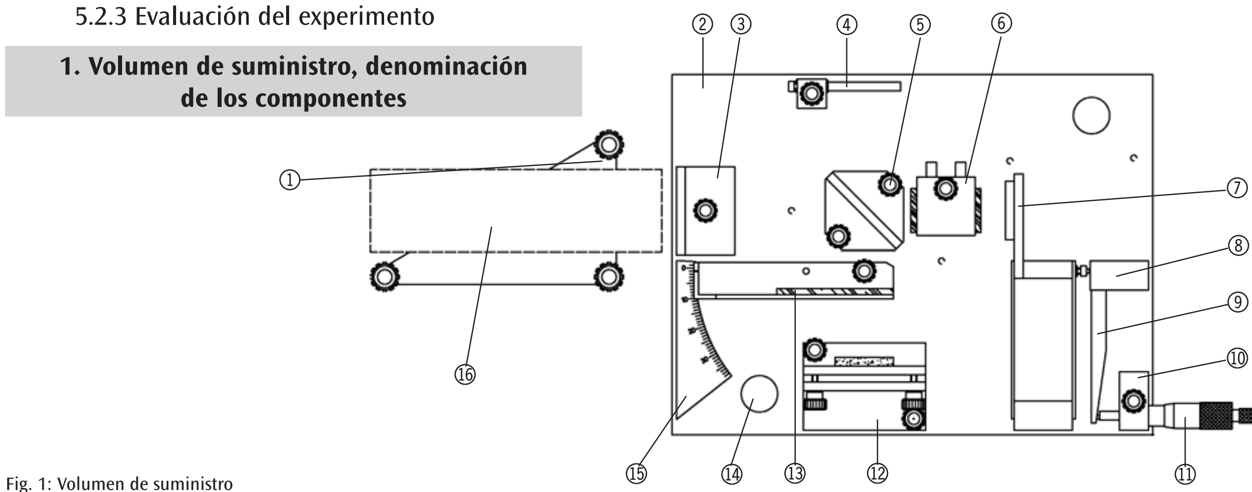


Fig. 1: Volumen de suministro

① Portador de láser
② Placa base
③ Lente de ensanchamiento
④ Pantalla (de proyección)
⑤ Divisor de haces
⑥ Celda de vacío (del equipo compl.)
⑦ Espejo de ajuste fino
⑧ Excéntrico con placa de calibración
⑨ Brazo del excéntrico
⑩ Soporte del micrómetro
⑪ Micrómetro
⑫ Espejo ajustable
⑬ Placa de vidrio sobre soporte (del equipo complementario)
⑭ Botón portador
⑮ Escala angular
⑯ Láser (no forma parte del volumen de suministro)
⑰ Caja estable de plástico (no visible en la imagen)

2. Aviso de seguridad

- El interferómetro se debe operar con un láser de He y Ne de la clase 2. Se debe evitar en lo absoluto mirar directamente hacia el rayo láser pues esto puede ocasionar quemaduras en la retina. ¡Las normas de seguridad adjuntas al láser se deben observar de manera estricta!
- El interferómetro se debe emplazar sobre una mesa estable, o en cualquier otro lugar adecuado, de manera que se evite una caída del aparato, lo cual podría provocar heridas en las personas debido al peso del equipo.
- El botón portador ⑭ sirve para elevar el interferómetro, para de esta manera tener un acceso seguro, por debajo, hacia la placa base.
- La máxima presión permitida en la celda de vacío ⑥ es de 200 kPas (2 bar) lo que corresponde a 100 kPas (1 bar) de sobrepresión. En caso de daños presentes en el vidrio de la celda, como por ejemplo rayaduras o grietas, se debe retirar inmediatamente del funcionamiento la celda de vacío, con fines de reparación. En los experimentos con sobrecarga se debe asegurar que ninguna persona se encuentre dentro del área de explosión de la celda. Dado el caso, se debe usar gafas de protección.

3. Introducción, datos técnicos

- En el año 1881, A. Michelson (1852 - 1931) llevó a cabo un experimento en el que un rayo de luz se dividió en dos por medio de un divisor de haces (véase también Fig. 2). Los dos haces fueron reflejados por espejos y superpuestos nuevamente en el divisor de haces, lo cual provoca la formación de interferencias si se tienen diferentes longitudes de onda entre ambos haces (extinción o mayor intensidad). Dado que también diferentes velocidades de luz podrían conducir a la aparición de dicha interferencia entre ambos haces, con este montaje experimental se puede demostrar que no existe el «éter» ni la «materia etérea», puesto que el haz con viento a favor debería ser más rápido que el que soporta viento de través. Además de servir para la comprobación de la no existencia del éter, un interferómetro también se puede emplear para la medición de longitudes de ondas luminosas y, ante longitudes de onda conocidas, para la medición de distancias muy cortas, lo cual, entre otras cosas, es importante para la comprobación de la calidad de superficie de los componentes ópticos.
- Este experimento clásico, así como algunos otros, se puede llevar a cabo por medio del interferómetro de precisión. En detalle, se trata de lo siguiente:

1. Interferómetro de Michelson
2. Interferómetro de Fabry-Perot
3. Determinación del índice de refracción del vidrio*
4. Determinación del índice de refracción del aire**
5. Test de Twyman-Green para componentes ópticos (cualitativo, no cuantitativo)*

* con equipo complementario (celda de vacío y placa base sobre soporte giratorio)
** con equipo complementario y bomba de vacío

- Gracias a las posiciones predeterminadas de los componentes, se posibilita un rápido montaje de los diferentes experimentos.

Descripción y datos técnicos

- Placa base de gran tamaño, pesada, rígida a la flexión, para mediciones precisas y reproducibles: 245x330x25 mm, 5,5 kg.
- Componentes ópticos de gran tamaño para imágenes de interferencia claras y nítidas. (40 mm Ø ó bien 40x40 mm).
- Espejo de superficie: Paso de radiación de 15%, reflexión 85% ante rayos de incidencia perpendicular.
- Divisor de haces extremadamente plano: Lado frontal 1/10 λ, lado posterior 1/4 λ. Paso de radiación de 50%, reflexión 50% con ángulo de incidencia de 45°, lado posterior antirreflexivo.
- Ajuste del espejo cómodo para el usuario, gracias a apoyo excéntrico de aprox. 1:1000 (una marca en el micrómetro corresponde a un desplazamiento del espejo de aprox. 10 nm) con una precisión dependiente de la fabricación de ±30%. La relación del ajuste del micrómetro, medida tras la fabricación, para el ajuste del espejo, se encuentra indicada en la placa de calibración, por ejemplo, con 1 mm $\triangleq$ 830 nm. Si se utiliza esta indicación, la medición de longitudes de onda debe tener una precisión mínima de ± 5% (desviación de linealidad y otros errores).
- Por medio de la pantalla de proyección de inclinación ajustable, con capacidad de reflexión, también se pueden realizar experimentos a la luz del día (sin radiación solar directa).

4. Operación y mantenimiento

- **Montaje del láser:** En primer lugar, se debe montar el láser en el portador de láser. Dado que el portador ha sido concebido para diferentes tipos de láser, posee tres perforaciones para tornillos avellanados (M5 ó M6), de los cuales, normalmente, sólo se necesita uno. La perforación correcta para el láser dado se determina a partir del centro de gravedad del láser y de sus posibilidades de fijación. Después del montaje, el centro de gravedad del láser se debe encontrar un poco por encima de la perforación media. La altura necesaria sobre la placa de trabajo del rayo de luz es de 60 - 62 mm. Si el rango de ajuste de los tornillos moleteados no resulta suficiente, se debe montar un anillo distanciador, u otro elemento similar, por debajo del láser. La longitud de los tornillos de fijación se debe seleccionar de manera que ni la carcasa del láser ni sus componentes internos se destruyan. Para ello, en primer lugar, se determina necesariamente la máxima profundidad posible de inserción de los tornillos en el alojamiento de láser y, a continuación, se selecciona un tornillo cuya rosca sobresalga menos de aprox. 2 mm del portador de

láser (el suministro incluye un tornillo y una rosca de cuatro cantos adecuadas para las ranuras comunes).

- **Divisor de haces:** El cristal del divisor de haces es antirreflexivo en uno de sus lados y, por el otro, está provisto de una capa 50% transparente, la cual está rotulada por medio de un triángulo, el cual también aparece en las ilustraciones de los arreglos experimentales.
- **Transporte, almacenamiento:** Al igual que en el estado de suministro, para el transporte y almacenamiento, el brazo del excéntrico ⑨ se debe encontrar siempre en el zócalo del espejo de ajuste fino ⑦, de esta manera se evitan puntos de presión sobre el excéntrico con giro de precisión.
- **Limpieza y mantenimiento del excéntrico:** El excéntrico de latón torneado hace presión sobre una bola de acero pulida del soporte del espejo de ajuste fino. Ante la presencia de polvo u otras impurezas, puede ocurrir que el ajuste del espejo no sea ya homogéneo sino que se vaya «hacia atrás». En este caso, se debe desatornillar el zócalo del excéntrico ⑧ (las cabezas de los tornillos se encuentran por debajo de la placa base ②) para limpiar el excéntrico de latón así como la bola de acero. Para el efecto, se debe emplear un paño suave, humedecido, dado el caso, con gasolina de lavado, acetona, u otro elemento similar. Durante el montaje del excéntrico se debe observar que se ejerza una leve presión sobre la bola de acero. Después del montaje se debe aplicar una gota de aceite libre de resina (aceite de máquina de coser o de armas) en el punto de contacto entre el excéntrico y la bola de acero.
- **Limpieza de los componentes ópticos de vidrio:** El espejo de superficie, el divisor de haces, la lente de ensanchamiento y las placas de la celda de vacío se pueden frotar con un paño suave, el cual, dado el caso, puede estar humedecido en etanol (alcohol). ¡Al hacerlo no se debe frotar ejerciendo presión! Resulta mejor trabajar con mucho alcohol y poco esfuerzo. La placa de vidrio que se encuentra sobre el soporte ⑬ sólo se debe limpiar en seco (dado el caso, soplar sobre ella), puesto que de lo contrario se despegarían las franjas de película adhesible (experimento de Twyman-Green).

5. Interferómetro de Michelson

5.1 Experimento estándar

5.1.1 Montaje experimental

- El montaje de los componentes sobre la placa base está representado en la Fig. 2. En la siguiente descripción del montaje, se parte del supuesto de que se deben llevar a cabo todos los ajustes básicos.
- Atornillar el láser de He y Ne al portaláser (véase instrucciones de servicio para el montaje de láser) y colocarlo aproximadamente derecho delante de la lente de ensanchamiento.
- Retirar el espejo ajustable y el divisor de haces y fijar la lente de ensanchamiento derecha sobre la placa base.
- Ajustar el láser de manera que el rayo reflejado por el espejo de ajuste fino retorne al centro de la lente de ensanchamiento.
- Aflojar el tornillo moleteado de la lente de ensanchamiento e inclinar la lente apartándola aproximadamente 90° del rayo láser.
- Montar el espejo ajustable y ajustarlo con los tornillos de ajuste de manera que la distancia entre la placa portadora del espejo y el soporte propiamente dicho sea igual en todo el perímetro (5 a 6 mm).
- En principio, atornillar levemente el divisor de haces, con el lado reflector en dirección de la división angular, y girarlo dentro de los límites más estrechos posibles para que los puntos más claros que se visualizan en la pantalla de proyección se encuentren, aproximadamente, en línea vertical. A continuación atornillar fijamente el divisor de haces.
- Mover el espejo ajustable por medio de los tornillos de ajuste hasta que los dos puntos más claros que se observan en la pantalla se cubran exactamente. Aquí ya se debe presentar interferencia, lo cual se puede notar por un centelleo.
- Girar nuevamente la lente de ensanchamiento hacia el rayo y atornillarla fijamente en la posición en la que se forma una imagen aproximadamente central en la pantalla (en relación a la claridad, no a los aros de interferencia). Inclinar la pantalla frente a las verticales de manera que el observador pueda visualizar una imagen luminosa y clara.
- Ajustar todavía de manera mínima el espejo de manera que los aros de interferencia se encuentren en la mitad de la pantalla.

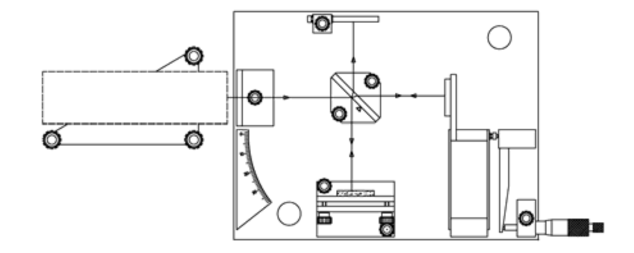


Fig. 2: Montaje experimental interferómetro de Michelson

- En este montaje los tiempos de paso de luz son casi iguales, lo que conduce a la aparición de distancias amplias y perfectamente observables entre los aros de interferencia. No obstante, condicionado por esto, también se produce una distorsión elíptica de los aros (también para tiempos de paso de luz exactamente iguales de los haces centrales se obtienen patrones de interferencia en la pantalla, con forma hiperbólica). Se puede girar 180° el divisor de haces para obtener aros casi circulares.

5.1.2 Ejecución de las mediciones

- Girar hacia fuera el tornillo micrométrico, en sentido antihorario, hasta aprox. 25 mm y luego volver a atornillarlo hasta 20 mm, para evitar imprecisiones de medida las cuales aparecen al variar el sentido giro.
- Volver a girar lentamente el tornillo micrométrico en sentido horario y contar la cantidad *m* de aros que aparecen. Para juzgar si ha aparecido un aro completo, se puede emplear la escala impresa sobre la pantalla de observación. Durante la medición, en lo posible, no debe entrar aire de la respiración en la trayectoria de los rayos, puesto que las modificaciones de la densidad del aire se vuelve directamente perceptibles por medio de aros de interferencia «errantes».
- Una vez que se hayan contado por lo menos 20 aros (mientras mayor sea la cantidad mayor será la exactitud de la medición) se lee la indicación en el tornillo micrométrico y se anota el resultado l_M.
- Para poder evaluar los posibles errores en el conteo de los aros, se deben repetir los pasos 1 – 3 por lo menos 3 veces.

5.1.3 Evaluación del experimento

- Si, por ejemplo, durante la primera medición se contó un número de aros $m = 30$, y se obtuvo como resultado 20 mm – l_M = 11,76 mm, entonces se obtiene, tomando en cuenta una reducción de, por ejemplo 1:830, un desplazamiento de espejo de l_S = 9761 nm y, por tanto, la longitud de onda es igual a:

$$\lambda = \frac{2\,l_S}{m} = 651\,\text{nm}$$

- Los resultados de todas las mediciones no deben desviarse más allá del 2 % si se realiza una cuidadosa ejecución del experimento. Si se determinan grandes divergencias, puede ser necesaria una limpieza del excéntrico (véase apartado 3, limpieza y mantenimiento del excéntrico).
- El resultado de medición de longitud de onda debe tener una exactitud de, por lo menos ± 5%. Es posible realizar una comprobación con un láser de longitud de onda conocida (láser de He y Ne: λ = 632,8 nm = 632,8 nm).

5.2 Índice de refracción del vidrio

5.2.1 Montaje experimental

- El montaje experimental corresponde, en principio, al del experimento estándar (véase apartado 5.1.1). A continuación, se lleva la placa de vidrio con el soporte giratorio, de acuerdo con la Fig. 3, hacia el haz parcial delantero y se vuelve a ajustar mínimamente el espejo, para visualizar los aros de interferencia en el centro de la pantalla.

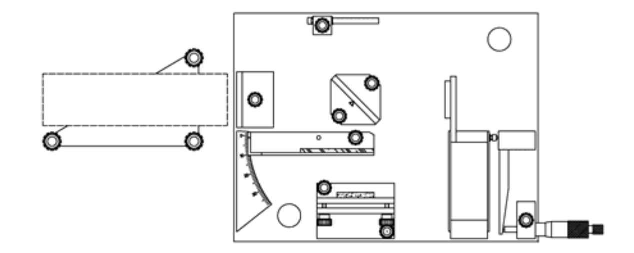


Fig. 3: Montaje experimental para la medición del índice de refracción del cristal

- Si ahora la placa de vidrio gira de ida y vuelta en un rango de aproximadamente 0°, el paso entre los aros de interferencia que aparecen y los que desaparecen, debe encontrarse exactamente a 0°. Si éste no es el caso, entonces el divisor de haces no se encuentra exactamente en un ángulo de 45° en relación al espejo de ajuste fino. Dado que es prácticamente imposible obtener una alineación exactamente perfecta del divisor de haces, se anota el ángulo ϕ_0, en el que se origina el paso de los aros de interferencia que aparecen y los que desaparecen. Para la evaluación se resta este ángulo del valor de medida ϕ_M para obtener el ángulo de giro ϕ real.

5.2.2 Ejecución de las mediciones

- Se gira lentamente la placa de vidrio, partiendo del ángulo ϕ_0. Al hacerlo, se cuenta el número *m* de aros que desaparecen. Mientras mayor sea el ángulo de giro, menor será la modificación angular que conduce a la desaparición de un aro. Por esta razón, para llegar a contar algo más de 20 aros se necesita obrar con un pulso manual seguro.

5.2.3 Evaluación del experimento

- Por medio del ángulo ϕ (p. ej. 5,4°), la cantidad *m* de aros medidos (p. ej. 20), la longitud de onda λ (en el aire) del láser empleado (p. ej. 633 nm) y la densidad del cristal *t* (en este caso, 4 mm) se obtiene, según el índice de Andrews[1)], el índice de refracción n_G del vidrio:

$$n_G = \frac{(2\,t - m\lambda)(1-\cos\phi) + \left(\frac{m^2\lambda^2}{4t}\right)}{2\,t(1-\cos\phi) - m\lambda} = 1{,}55$$

- Si se comparan los resultados propios con los indicados por la literatura, se debe tener siempre en cuenta que el índice depende de la longitud de onda, y que, correspondientemente, sólo se deben comparar valores en la misma longitud de onda.

5.3 Índice de refracción del aire

5.3.1 Montaje experimental

- En principio, el montaje experimental corresponde al del experimento estándar (véase también el apartado 5.1.1) con la diferencia de que para este

1) C. L. Andrews, Optics of the Electromagnetic Spectrum, Prentice-Hall, 1960

experimento, necesariamente, la capa reflectora del divisor de haces debe estar dirigida hacia la derecha. A continuación, se lleva la celda de vacío hacia el haz parcial derecho, de acuerdo con la Fig. 4, y el espejo ajustable se reajusta mínimamente para que los aros de interferencia aparezcan en la mitad de la pantalla.

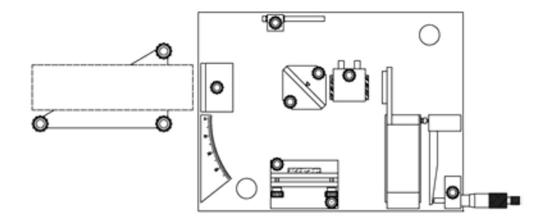


Fig. 4: Montaje experimental para la medición del índice de refracción del aire

5.3.2 Ejecución de las mediciones

- La bomba de vacío se conecta a la celda de vacío y se anota la presión visualizada p. A continuación, se evacua lentamente la celda y se realiza el conteo del número m de aros que desaparecen. Se anota la presión y la cifra correspondiente en periodos regulares de tiempo. Cuando se ha alcanzado la presión mínima (aprox. 10 kPas, con una bomba de mano sencilla), se vuelve a llenar de aire la celda de vacío. Ahora se puede realizar una serie de medición con sobrepresión (hasta máx. 200 kPas lo que corresponde a 1 bar de sobrepresión).

5.3.3 Evaluación del experimento

- Con una presión $p = 0$, el índice de refracción es $n(p = 0) = 1$. Si la presión aumenta, el índice de refracción asciende de acuerdo con:

$$n(p) = 1 + \frac{\Delta n}{\Delta p} p \,.$$

- Para la determinación del índice de refracción bajo presión normal, se debe determinar, en primer lugar, el incremento $\Delta n / \Delta p$. Para la primera alimentación es válido:

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = \frac{\lambda}{2 l_z} \left| \frac{\Delta m}{\Delta p} \right|$$

- En donde m es la cantidad de aros emergentes o la de los que desaparecen, λ es la longitud de onda e l_z es la longitud interior de la celda de vacío (en este caso, 41 mm). Si, por ejemplo, para una disminución de presión de alrededor de $\Delta p = 90$ kPas se determinó la correspondiente $\Delta m = 25$, entonces se obtiene $\Delta n / \Delta p = 2{,}14 \times 10^{-9}$ 1/Pas.
- Por tanto, el índice de refracción del aire bajo presión ambiental (100 kPas) es igual a $n = 1{,}00021$. En la literatura[2)] se encuentra el valor $n = 1{,}00029$.

6. Interferómetro de Twyman-Green

- Con este experimento se puede determinar la calidad de superficie de los componentes ópticos. Normalmente, se conoce como interferómetro de Twyman-Green un interferómetro en el que el rayo luminoso (láser) es ensanchado y paralelo. Para la comprensión cualitativa del principio de funcionamiento, se puede emplear también – como se ha hecho en los experimentos realizados hasta ahora – un haz de luz ensanchado pero no paralelo.

6.1 Montaje experimental

- A manera de superficie óptica defectuosa, se emplea una película adhesiva transparente, la cual se encuentra pegada sobre una placa de cristal y que, a simple vista, parece completamente homogénea.
- El montaje experimental corresponde, en principio, al del experimento estándar (véase apartado 5.1.1). A continuación, se lleva la placa de vidrio, con el soporte giratorio, de acuerdo con la Fig. 5, hacia el haz parcial delantero y se vuelve a ajustar mínimamente el espejo, para visualizar los aros de interferencia en el centro de la pantalla.

6.2 Ejecución del experimento e interpretación de las observaciones

- En el lado derecho de la pantalla se observan, al igual que en el experimento 5.1, aros de interferencia homogéneos. Por el contrario, en el lado izquierdo, los aros presenta deformaciones y, parcialmente, se encuentran puntos claros en las áreas propiamente oscuras y viceversa. Dado que por el experimento 5.2 es conocido que incluso muy pequeñas variaciones de la densidad de una superficie (lo que se logró en el experimento 5.2 al girar la placa de vidrio) conducen a un desplazamiento de los aros de interferencia, se debe suponer que, aquí, las distorsiones de los aros se deben a la superficie no homogénea y montañosa de la película adhesiva.

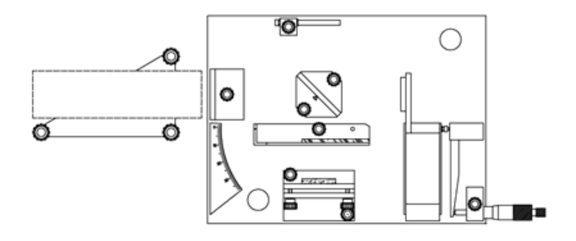


Fig. 5: Montaje experimental para medición de la calidad de superficie de componentes ópticos

2) H. Stöcker, Taschenbuch der Physik, Deutsch, 1998

7. Interferómetro de Fabry-Perot

7.1 Montaje experimental

- El montaje de los componentes sobre la placa base está representado en la Fig. 6. En la siguiente descripción del montaje, se parte del supuesto de que se deben llevar a cabo todos los ajustes básicos.
- Atornillar el láser de He y Ne al portaláser (véase instrucciones de servicio para el montaje de láser) y colocarlo aproximadamente derecho delante de la lente de ensanchamiento.
- Retirar el espejo ajustable y la lente de ensanchamiento y colocar el láser delante de la placa base con un leve giro alrededor del eje vertical A continuación, ajustar la inclinación del láser de manera que el haz parcial reflejado de retorno en el láser se encuentre a la misma altura del haz emitido. Si ahora se vuelve a colocar el láser en posición recta delante de la placa base, se deben observar dos puntos en la pantalla de proyección, los cuales se deben ajustar hasta que se cubran.
- Llevar la lente de ensanchamiento a la trayectoria del rayo y, dado el caso, ajustar la altura del rayo girando homogéneamente los 3 tornillos moleteados. A continuación, dado el caso, volver al paso 2. (Ahora, eventualmente, ya se pueden ver débiles aros de interferencia en la pantalla, dado que el lado del cristal propiamente transparente del espejo de ajuste fino también presenta mínimas reflexiones).
- Girar otra vez aproximadamente 90° la lente de ensanchamiento desde el rayo láser.
- Montar el espejo ajustable con sumo cuidado. La distancia entre los dos espejos debe ser de aproximadamente 2 mm.
- Colocar el espejo ajustable de manera que todos los puntos y, dado el caso el patrón de interferencia, se junten sobre la pantalla de proyección.
- Girar nuevamente la lente de ensanchamiento hacia el rayo y atornillarla fijamente en la posición en la que se forma una imagen aproximadamente central en la pantalla (en relación a la claridad, no a los aros de interferencia). Inclinar la pantalla frente a las verticales de manera que el observador pueda visualizar una imagen luminosa y clara.
- Ajustar todavía de manera mínima el espejo de manera que los aros de interferencia se encuentren en la mitad de la pantalla.

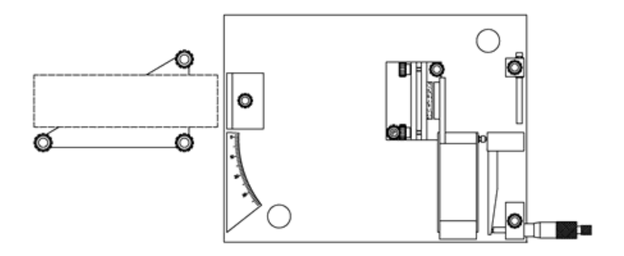


Fig. 6: Montaje experimental interferómetro de Fabry-Perot

7.2 Ejecución de las mediciones

- Girar hacia fuera el tornillo micrométrico, en sentido antihorario, hasta aprox. 25 mm, y luego volver a atornillarlo hasta 20 mm, para evitar imprecisiones de medida, las cuales aparecen al variar el sentido giro.
- Volver a girar lentamente el tornillo micrométrico en sentido horario y contar la cantidad *m* de aros que aparecen.
- Una vez que se hayan contado por lo menos 20 aros, se lee el valor indicado en el tornillo micrométrico y se anota el resultado obtenido para l_M.
- Para poder evaluar los posibles errores en el conteo de los aros, se deben repetir los pasos 1 - 3 por lo menos 3 veces.

7.3 Evaluación del experimento

- Si, por ejemplo, se contó un número de aros $m = 40$ y se midió 20 mm – l_M = 15,13 mm, entonces se obtiene un desplazamiento de espejo (excéntrico 1:830) de l_S = 12560 nm y, por tanto, una longitud de onda (véase también la explicación del apartado 5.1.3):

$$\lambda = \frac{2l_S}{m} = 628\ \text{nm}$$